UNTERSUCHUNGEN

ÜBER

DIE WIRKUNG VON SOLENOIDEN

AUF

VERSCHIEDEN GEFORMTE EISENKERNE.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER PHILOSOPHISCHEN
DOCTORWÜRDE

EINGEREICHT

BEI DER

KÖNIGL. BAYER. FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT

ZU ERLANGEN

VON

THEODOR BRUGER

AUS JABEL IN MECKLENBURG-SCHWERIN.

BERLIN 1886.

GEDRUCKT IN DER REICHSDRUCKEREI.

UNTERSUCHUNGEN

ÜBER

DIE WIRKUNG VON SOLENOIDEN

AUF

VERSCHIEDEN GEFORMTE EISENKERNE.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER PHILOSOPHISCHEN
DOCTORWÜRDE

EINGEREICHT

BEI DER

KÖNIGL. BAYER. FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT

ZU ERLANGEN

VON

THEODOR BRUGER

AUS JABEL IN MECKLENBURG-SCHWERIN.

BERLIN 1886.

GEDRUCKT IN DER REICHSDRUCKEREI.

Die Untersuchungen, welche über die Wirkung von Solenoiden auf Eisenkerne gemacht worden sind, datiren schon ziemlich weit zurück. Sie sind theils rein theoretischer, theils experimenteller Natur und verfolgen, soweit sie letzterer Gattung angehören, meistens den Zweck, eine Basis für die Konstruktion elektromagnetischer Bewegungs-, Regulirungs- oder Meſsapparate zu liefern. In dieser Hinsicht sind unter den älteren besonders bemerkenswerth die Versuche Hankels [1]), welche sich auf zylindrische Spiralen und ebensolche Eisenkerne beziehen, und auf Grund welcher Hankel eine elektromagnetische Maschine konstruirte; ferner aus neuerer Zeit die Publikationen Křižiks und Böttchers, in welchen in erster Linie auch über Versuche mit doppeltkonischen Eisenkernen berichtet wird.

Die Bedeutung der letzteren Untersuchungen liegt besonders darin, daſs es wohl die ersten sind, die man über die Anziehung nicht zylindrischer Eisenkerne durch ein Solenoid angestellt hat. Da nun aber die Resultate Böttchers mit denen Křižiks nicht übereinstimmen, so erscheint immerhin die Aufgabe von einiger Wichtigkeit, durch eingehendere Versuche über nicht

[1]) Vgl. Berichte der Königl. sächsischen Gesellschaft der Wissenschaft 1850, S. 78 ff.

zylindrische und speziell konische Eisenkerne die hier vorliegenden Fragen der Entscheidung näher zu bringen. An diese Versuche würde man gleich weitere zu knüpfen haben, um eine neue Kernform zu ermitteln, welche besser wie die konische den Bedingungen eines gleichmäfsig wirkenden Regulators genügt.

Eine in der angedeuteten Weise durchgeführte Lösung des durch die Křižik-Böttcherschen Versuche angeregten Problems soll im Folgenden versucht werden.

Die Křižik-Böttcher'sche Streitfrage.

Die gebräuchlichsten Bogenlampen-Regulatoren kann man in zwei Kategorien theilen: Der einen, gröfseren, gehören alle diejenigen an, bei welchen die als regulirendes Prinzip verwerthete Wechselwirkung zwischen einem Solenoide und einem Eisenkern immer nur bei einer im Wesentlichen ungeänderten relativen Lage der beiden Wirkungsorgane zu einander in Funktion tritt, während sich bei der zweiten Gattung der Eisenkern mit der abbrennenden und sinkenden Kohle verschiebt und also fortwährend seine Lage gegen das feste Solenoid ändert.

Bei dieser letzten Anordnung erscheint es als wünschenswerth, dafs die Anziehung des Solenoides bei verschiedener relativer Lage des Eisenkernes eine konstante bleibe, eine Forderung, welche ein Mechanismus einfachster Art, aus einem Solenoide und einem Eisenzylinder bestehend, nicht erfüllt. Man kann zwar auch, worauf Professor Dietrich hingewiesen hat, eine gleichmäfsige Bewegung des bezüglichen Eisenkernes selbst bei ungleichförmiger Wirkung des Solenoides durch eine entgegengesetzt ungleichmäfsig wirkende mechanische

Kraft erzielen, doch erscheint das Vermeiden eines derartigen Hülfsmechanismus immerhin von Vortheil, da gerade für den Regulator einer Bogenlampe möglichst einfaches Funktioniren und kompendiöse Form zwei Hauptforderungen sind.

Die nach der anderen Seite hin gemachten Vorschläge, welche den Zweck verfolgen, die Solenoidwirkung selbst ohne weitere mechanische Hülfsmittel zu einer gleichmäfsigen zu machen, rühren von Křižik her, welcher bezüglich der Wirkung von Solenoiden auf Eisenkerne folgende Behauptungen aufstellt[2]):

Ein Eisenzylinder wird in ein stromdurchflossenes Solenoid hineingezogen, so lange, bis seine Mitte mit dem Mittelpunkte des Solenoides zusammenfällt. Das Maximum der Anziehung findet statt, wenn sich das Ende des Zylinders mit dem mittleren Querschnitte der Spule in einer Ebene befindet; von da nimmt nach beiden Seiten die Anziehung bis o bezw. bis zu einem negativen Maximum ab. Auf keinen Fall kann durch Wechselwirkung zwischen einer zylindrischen Spule und einem dieser konaxialen Eisenzylinder eine bei Verschiebung des letzteren ungeändert bleibende konstante Anziehung erzeugt werden. Will man eine konstante Anziehung, so mufs man dem Eisenkern eine andere als die zylindrische Form geben und als eine solche schlägt Křižik den Doppelkonus vor. Er geht dabei von dem Gedanken aus, dafs man durch Aenderung des Querschnittes eines Eisenkernes an den betreffenden Stellen die Anziehung ändern könne, dafs man also, von einem Zylinder ausgehend, an den Stellen zu geringer Anziehung

[2]) Vgl. Uppenborn, Centralblatt für Elektrotechnik, Bd. III, S. 7 ff.

den Querschnitt zu vergrößern, und an denen zu großer Anziehung den Querschnitt zu verkleinern habe. Man wird so auf die Form des Doppelkonus, bestehend aus zwei mit ihrer Basis an einander liegenden Kegeln, geführt, und bei Anwendung dieser Form soll nach Křižiks Meinung die Anziehung fast auf die halbe Kernlänge, d. h. bei Verschiebung des Kernes um seine halbe Länge eine gleichförmige sein.

Genauere Angaben, wie Tabellen oder Kurven, welche die Resultate etwa angestellter Versuche enthielten, sind dem betreffenden Aufsatze nicht beigefügt.

Diesen Auseinandersetzungen trat nun Dr. Böttcher entgegen[3]), indem er zunächst die Ansicht für unrichtig erklärte, daß das Maximum der Anziehung immer stattfinde, wenn das Kernende mit der Spulenmitte zusammenfalle — der Ort des Maximums soll vielmehr von der Spulenlänge abhängen — und indem er zweitens durch Versuche nachzuweisen suchte, daß die Anziehung eines Doppelkonus sich nicht wesentlich von der eines zylindrischen Kernes unterscheide.

Bezüglich des ersten Punktes, welcher hier in Frage kommt und der den Ort der maximalen Anziehung betrifft, kann man Folgendes bemerken:

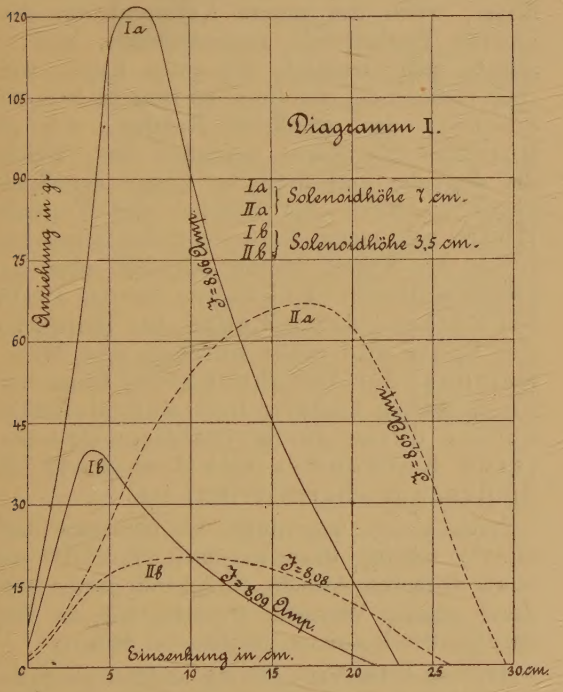
Es ist früher bereits mehrfach durch Versuche nachgewiesen, daß die Behauptung Křižiks über den Ort der maximalen Anziehung allgemein nicht richtig ist. Diesen älteren Untersuchungen fügte ich einige weitere hinzu, welche ebenfalls über den hier in Frage kommenden Punkt Aufschluß geben konnten.

---

[3]) Vgl. Uppenborn, Centralblatt 1884, S. 324 ff.

Ich verkürzte nämlich meine anfänglich benutzte Spule auf die Hälfte bezw. ein Viertel ihrer Länge und untersuchte schliefslich noch eine Spule, welche nur eine Windung, jedoch ebenso viele Lagen wie die vorigen enthielt. Der Eisenkern wurde unverändert beibehalten.

Die Resultate dieser Versuche finden sich in den auf Diagramm 1 gezeichneten Kurven, die in folgender Weise konstruirt sind:



Auf der Abszissenaxe wurden die Strecken abgetragen, um welche das untere Kernende sich unterhalb des oberen Spulenendes befand,

während die Ordinaten die entsprechenden Anziehungen in Gramm darstellen. Der verwendete Eisenzylinder war 39 cm lang, während die Spulen eine Höhe von 0,8, 3,5 und 7 cm hatten. (Die Höhe des sonst benutzten Solenoides betrug 13 cm, also ein Drittel der Kernlänge.) Man ersieht aus diesen Kurven, von denen S. 7 nur die den beiden letzten Solenoidhöhen entsprechenden gezeichnet sind, dafs hier das Maximum der Anziehung stattfindet, wenn der untere Kernrand mit dem unteren Spulenrande zusammenfällt, und es ergiebt sich demnach für einen Kern, welcher sechs- oder zwölfmal so lang ist, wie das Solenoid, das nämliche Resultat, wie es Böttcher für Kerne gefunden hat, welche die doppelte und dreifache Länge der Spule besafsen. Auch das Resultat der Versuche Hankels mit einem Kerne von der achtfachen Länge der Spirale stimmt mit dem eben gefundenen überein. Es scheint somit, als ob bei Kernen, deren Länge das Doppelte der Spule und mehr beträgt, der Maximalpunkt der Anziehung seine Lage nur noch wenig ändert, und dafs derselbe nahezu durch das Koïnzidiren des unteren Kernendes mit dem unteren Spulenende charakterisirt ist.

Nach einem neuerdings erschienenen Aufsatze[4]) scheint übrigens auch Křižik von seiner früheren Ansicht zurückzukommen und durch eigene Versuche ähnliche wie die hier angeführten Resultate erhalten zu haben.

Dafs auch bei Verwendung anderer als zylindrischer Kerne sich die Lage des Maximalpunktes der Anziehung mit der Spulenlänge ändert,

[4]) Vgl. Uppenborn, Centralblatt 1885, S. 136 ff.

zeigen die schwarz gestrichelten Kurven auf Diagramm 1, welche die Anziehungen eines konischen Eisenkernes durch die eben beschriebenen verschieden langen Spiralen darstellen. Im Uebrigen geht aus anderen Versuchen, welche von mir mit einer 13 cm langen Spirale und dem vorigen Eisenzylinder angestellt sind, hervor, dafs, wie man auch vermuthen konnte, bei zylindrischen Kernen die Lage des Maximalpunktes der Anziehung von der Stromstärke unabhängig ist.

Was den zweiten und Hauptpunkt der Streitfrage, die gleichförmige Anziehung eines Doppelkonus durch eine Spirale bei Verschiebung um seine halbe Länge betrifft, so ist ebenfalls die Behauptung Böttchers, dafs sich ein Doppelkonus in dieser Hinsicht wenig von einem Zylinder unterscheide, durch meine Versuche im Ganzen bestätigt worden. Jedenfalls kann die Ansicht Křižiks, dafs ein Doppelkonus bei Verschiebung um fast seine halbe Länge mit konstanter Kraft von einem Solenoide angezogen werde, nicht richtig sein. Das ist schon aus dem Grunde unmöglich, weil der Doppelkonus in der Mitte seiner Längsaxe seinen geometrischen Mittelpunkt hat und für alle derartigen symmetrisch gestalteten Körper die Anziehung gleich Null ist, wenn dieser ihr Mittelpunkt in die Mitte des Solenoides fällt. Anziehung findet also überhaupt nur statt, so lange sich die Mitte des Konus noch oberhalb der Mitte des Solenoides befindet, und da für eine so begrenzte Verschiebung die Anziehung von Null bis zu einem Maximum steigt und dann wieder bis Null abnimmt, so kann nicht wohl von konstanter Anziehung während der Verschiebung des Doppelkonus um seine halbe Länge die Rede sein.

Man kann es jedoch als zweckmäfsige Verbesserung bezeichnen, wenn später in den von Křižik angegebenen Lampenregulatoren der Doppelkonus durch einen langen einfachen Konus ersetzt worden ist; erst so kommt der Hauptvortheil der konischen Kernform zur Geltung, welcher darin besteht, dafs hier nicht dem Nullwerthe der Anziehung die Koïnzidenz von Kernmitte und Solenoidmitte entspricht, sondern dafs dieser Nullpunkt gegen das eine dickere Kernende hin verschoben erscheint. In Folge dieser Verschiebung ist die Strecke der positiven Anziehung bedeutend gröfser als die halbe Kernlänge, d. h. bedeutend gröfser als sie es bei einem gleich langen Zylinder oder Doppelkonus sein würde.

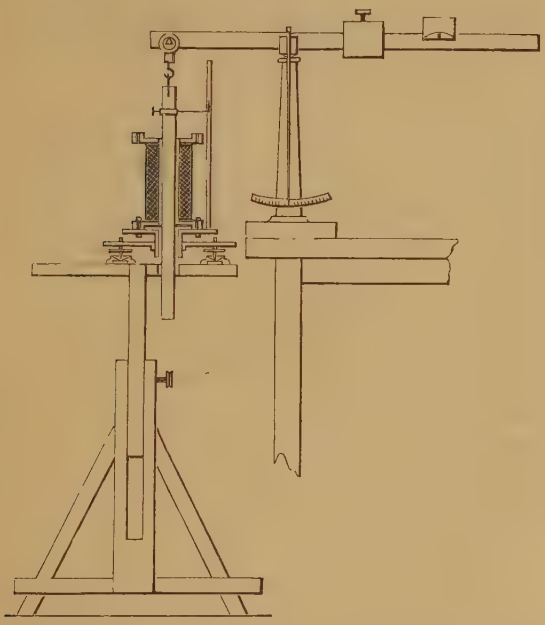
Anordnung und Methode der Versuche.

Der benutzte Apparat, welcher in Fig. 1 dargestellt ist, war in folgender Weise angeordnet:

Auf einem Holztischchen mit durchbohrter Platte, welche in vertikaler Richtung gehoben oder gesenkt werden konnte, stand ein mit drei Stellschrauben versehener Messingaufsatz, in welchen wieder ein kleines verstellbares Messingtischchen geschraubt war. Messingaufsatz und Tischchen nebst Schraube waren in der Mitte ebenfalls durchbohrt, so dafs der darüber an einem Waagebalken hängende Eisenkern bequem und ohne auch bei etwaigen Vibrationen anzustofsen hindurchgleiten konnte. Auf dem Messingaufsatze war noch eine vertikale, in Millimeter getheilte versilberte Skala befestigt, an welcher man die Einsenkung des Kernes in die Spule ablesen konnte. Diese letztere wurde auf das obere Tischchen geschraubt und war also mit diesem sowie mit

dem Holztisch auf und ab bewegbar. Die benutzte Waage, welche ebenso wie die übrigen Apparate speziell für diesen Zweck angefertigt war, hatte eine Konstruktion ähnlich der der bekannten Mohr'schen Waage. Auf einer mit schwerem Fufse versehenen Messingsäule, welche

Fig. 1.



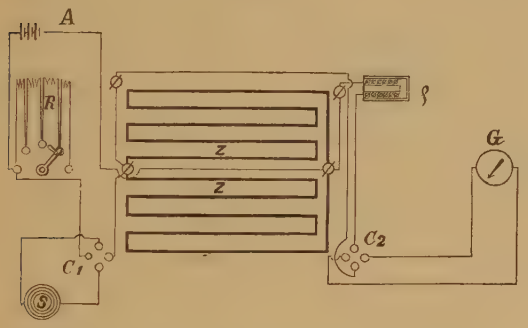
oben mit Stahl belegt war, balanzirte auf einer Stahlschneide ein in Millimeter getheilter Waagebalken, dessen Arme bezw. 200 und 350 mm lang waren. Am Ende des kürzeren Armes war ebenfalls an einer Stahlschneide ein Haken aufgehängt, an welchem der zu untersuchende

Eisenkern befestigt wurde. Der längere Arm des Waagebalkens war mit einem Laufgewichte versehen, welches durch eine Schraube festgestellt werden konnte und dazu diente, das Gewicht des Eisenkernes an sich, ohne dafs eine anziehende Kraft auf denselben wirkte, auszubalanziren. Die anziehende Kraft des Solenoides wurde dann durch besondere auf dem Waagebalken verschobene Messinggewichte gemessen, die mittels einer eingeritzten Marke auf die verschiedenen Theilstriche eingestellt werden konnten. Die relative Lage von Solenoid und Eisenkern zu einander wurde an der oben erwähnten, auf dem Messingtischchen festen Skala vermittelst eines Zeigers abgelesen, der oben an die betreffenden Kerne angeschraubt werden konnte und zwei Schneiden hatte, über welche nach der Skala visirt wurde. Die Ermittelung der Anziehungskraft geschah in folgender Weise: Zunächst ward bei offenem Strome die Einsenkung des Kernes in das Solenoid abgelesen und dann wurden nach dem Stromschlufs auf den längeren Waagebalken Gewichte so aufgelegt, dafs wieder Gleichgewicht herrschte und Kern und Spule also dieselbe Lage zu einander hatten, wie vorher. Man mufste darauf achten, dafs bei dem Stromschlusse der Kern nicht plötzlich tief in das Solenoid hineingezogen wurde, sondern denselben arretiren, so dafs er seine ursprüngliche Lage nur wenig oder gar nicht ändern konnte. Es trat sonst eine zu starke Magnetisirung ein und die für die Anziehung in der betreffenden Lage gefundenen Werthe fielen zu grofs aus.

Die Schaltung und Stromleitung ist aus der in Fig. 2 gegebenen schematischen Darstellung ersichtlich:

Von seinem Ursprunge A geht der Strom durch den Kurbelrheostaten R zum Kommutator C_1, dann durch das Solenoid S und den Shunt Z nach A zurück. Das Galvanometer G liegt nebst dem Stöpselrheostaten ρ und dem Kommutator C_2 in Nebenschluſs zu Z, so daſs die Strommessung nach der Nebenschluſsmethode[5]) stattfand. Mittels ρ wurde die Empfindlichkeit des Wiedemann'schen Galvanometers mit Spiegelablesung variirt, und nahm ich etwa alle drei Wochen eine Aichung

Fig. 2.



des letzteren mittels eines Kupfervoltameters vor. Als Stromquelle standen mir Akkumulatoren zur Verfügung. Es wurden immer nur die Versuchsreihen für die Berechnung der Tabellen und die Konstruktion der Kurven benutzt, bei welchen die Stromschwankungen weniger als 1 % betrugen. Die Kurven sind sämmtlich in der oben angegebenen Weise konstruirt, so daſs also die Abszissen die Versenkung des Eisenkernes in Centimetern und die Ordinaten die entsprechenden Anziehungen in Grammen darstellen.

[5]) Vgl. Kittler, Wiedemanns Annalen 1885, S. 593 ff.

Bei Anwendung kleiner Stromstärken kam noch ein Umstand in Betracht, auf welchen schon Hankel[6]) hingewiesen hat. Es zeigte sich nämlich, dafs die Richtung, in welcher der Strom das Solenoid durchfloſs, von Einfluſs war auf die Kraft, mit welcher der Kern eingezogen wurde, eine Erscheinung, welche Hankel der auf das Eisen polarisirend wirkenden Vertikalkomponente des Erdmagnetismus zuschreibt. Vielleicht muſs man neben der Wirkung des Erdmagnetismus in den Kernen noch die eines geringen permanenten Magnetismus voraussetzen. Da sich übrigens zeigte, dafs diese sekundäre Wirkung die ganze Gestalt der bezüglichen Kurven nicht merklich beeinfluſste, und da dieselben bei Anwendung stärkerer Ströme verhältniſsmäſsig geringer und zuletzt nicht mehr genau meſsbar wurde, so sah ich später davon ab, für jeden Kurvenpunkt eine Doppelbeobachtung zu machen, und achtete nur darauf, dafs der Strom immer in der nämlichen Richtung das Solenoid durchfloſs.

Resultate der Beobachtungen.

Vergleichung eines Eisenzylinders mit einem Doppelkonus:

Der untersuchte Eisenzylinder war 39 cm lang und 1,5 cm dick, während der etwas kürzere Doppelkonus in der Mitte, wo also die Grundflächen beider Kegel zusammenstieſsen, einen Durchmesser von 2 cm und an den Enden einen solchen von 3 mm hatte. Das benutzte Solenoid war für eine Schuckert'sche Bogenlampe (System Křižik-Piette) be-

[6]) Vgl. Hankel, Berichte der Königl. sächsischen Gesellschaft der Wissenschaft 1850, S. 78.

stimmt und mir durch die Güte des Herrn Schuckert für meine Versuche zur Verfügung gestellt. Dasselbe hatte eine Höhe von 13 cm und war mit 2,6 mm starkem Kupferdraht in 7 Lagen mit je 38 Windungen bewickelt. Die Anziehung beider Kerne wurde bei 5 verschiedenen Stromstärken, von etwa 1,5 bis 8 Ampère, untersucht, und finden sich die erhaltenen Resultate in den Kurven auf Diagramm 2 (S. 16). Die gestrichelten Kurven beziehen sich hier auf den doppelkonischen, die ganz ausgezogenen auf den zylindrischen Kern. Eine Betrachtung derselben zeigt, dafs wir die nämlichen Resultate haben, welche auch Böttcher erhielt, und dafs also die oben ausgesprochenen Sätze durch das Experiment nur bestätigt werden. Es ist somit ein Doppelkonus kein Kern konstanter Anziehung, sondern er unterscheidet sich in seiner Wirkung nur wenig von einem Zylinder. Der Nullpunkt und der Punkt der maximalen Anziehung hat bei beiden Kernen dieselbe Lage, und es läfst sich, wenn man einen zylindrischen durch einen doppelkonischen Kern ersetzt, kein nennenswerther Vortheil erreichen. Auch bei geänderter Stromstärke behalten die Kurven ihre Gestalt, und die beiden charakteristischen Punkte ändern ihren Ort nicht.

Vergleichung eines Eisenzylinders mit einem Eisenkonus:

Der Eisenzylinder war derselbe wie bei den vorigen Versuchen, der Konus, oben mit zylindrischem Ansatze versehen, gehörte wie das Solenoid einer Bogenlampe an. Er hatte gleiches Gewicht wie der Eisenzylinder und ist in $^1/_4$ natürl. Gröfse in Fig. 3a (S. 17) dargestellt. Schon oben bei Darlegung der hier behandelten

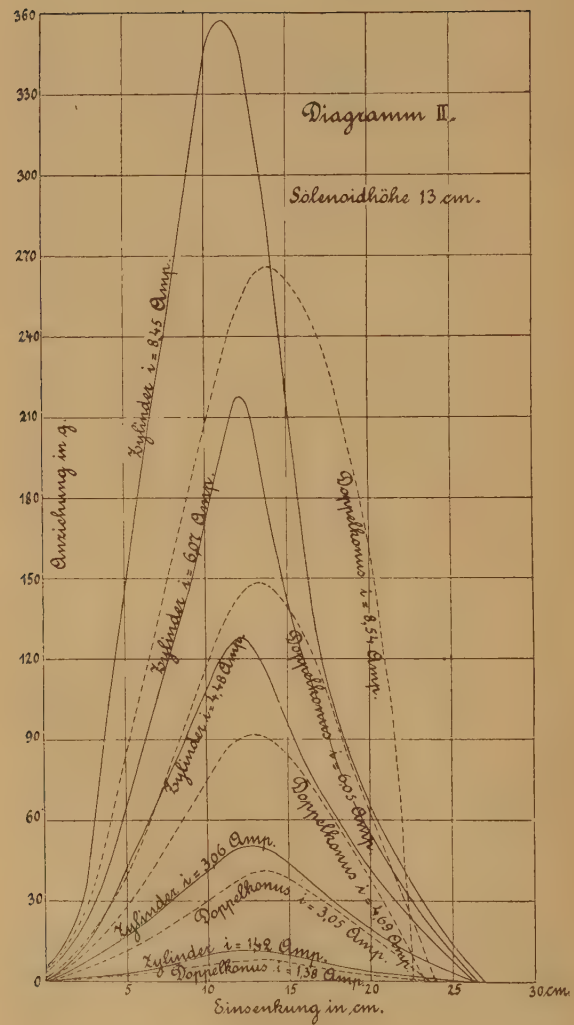


Diagramm II.
Solenoidhöhe 13 cm.
Anziehung in g.
Einsenkung in cm.
Zylinder i = 8,45 Amp.
Zylinder i = 6,01 Amp.
Zylinder i = 4,48 Amp.
Zylinder i = 3,06 Amp.
Zylinder i = 1,52 Amp.
Doppelkonus i = 8,54 Amp.
Doppelkonus i = 6,05 Amp.
Doppelkonus i = 4,69 Amp.
Doppelkonus i = 3,05 Amp.
Doppelkonus i = 1,38 Amp.
360
330
300
270
240
210
180
150
120
90
60
30
0
5
10
15
20
25
30 cm.

Fig. 3.

Streitfrage wurde gesagt, dafs man unmittelbar durch Ueberlegung einen gewissen Vortheil in der Ersetzung des Doppelkonus durch einen einfach konischen Kern findet. Jetzt sehen wir diese Behauptung bestätigt durch die auf Diagramm 3 (S. 19) gegebenen Kurven. Dieselben stellen wieder neben einander die Anziehungen eines Zylinders und eines einfachen Konus für fünf verschiedene Stromstärken dar, deren höchste etwa der in den Bogenlampen wirklich verwendeten entspricht. Die Ueberlegenheit des einfachen Konus über den Zylinder und den Doppelkonus erkennt man sofort, besonders wenn man bemerkt, dafs die Krümmung der auf den Konus bezüglichen Kurven oben eine viel flachere ist, wie die der für den Zylinder gefundenen. Für einen Kern ganz konstanter Anziehung würde diese Kurve ja parallel zur Abszissenaxe verlaufen müssen.

Zu einem besonders klaren Ueberblick über die Wirkungsweise dieser drei verschiedenen Kernformen gelangt man jedoch dadurch, dafs man in Prozenten der vorkommenden Maximalanziehung die Aenderungen berechnet, welche die anziehende Kraft bei einer Verschiebung des bezüglichen Kernes um eine bestimmte Strecke, z. B. um 10 cm, erleidet. Natürlich berücksichtigt man nur den günstigsten Theil der Kurven, also hier die Umgebung ihres Maximalpunktes. 10 cm ist nur etwas über ein Viertel der ganzen Kernlänge, und doch findet man selbst bei dem einfachen Konus noch recht bedeutende Aenderungen der anziehenden Kraft. Die folgende kleine Tabelle giebt für die fünf gewählten Stromstärken und die drei bis jetzt besprochenen Kernformen einen derartigen Ueberblick:

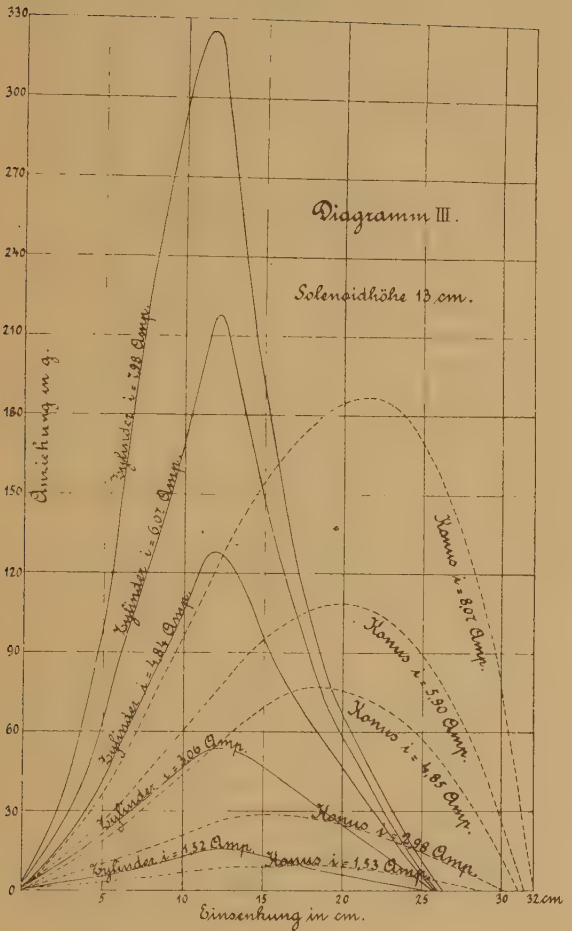


Diagramm III.
Solenoidhöhe 13 cm.
Anziehung in g.
Einsenkung in cm.
Zylinder i = 7,39 Amp.
Zylinder i = 6,07 Amp.
Zylinder i = 4,84 Amp.
Zylinder i = 3,69 Amp.
Zylinder i = 1,52 Amp.
Konus i = 8,01 Amp.
Konus i = 5,90 Amp.
Konus i = 4,85 Amp.
Konus i = 2,98 Amp.
Konus i = 1,53 Amp.
330
300
270
240
210
180
150
120
90
60
30
0
5
10
15
20
25
30
32 cm

Kernform	Stromstärke in Ampère	Maximum der Anziehung auf der betrachteten Strecke	Minimum der Anziehung auf der betrachteten Strecke	Aenderung in Prozent der Maximalanziehung
		Gramm	Gramm	
Cylinder	1,42	11,5	6,8	41
	3,06	56,3	29,0	48
	4,84	127,2	68,0	47
	6,07	217,0	105,0	51
	8,45	358,0	174,0	51
Doppelkonus	1,38	7,65	4,6	39
	3,05	40,4	24,0	40
	4,69	92,0	56,8	38
	6,05	147,0	96,0	35
	8,538	265,0	186,0	30
Konus	1,53	8,2	7,0	15
	2,94	29,0	24,6	15
	4,85	75,5	64,5	15
	5,91	108,0	92,8	14
	8,07	187,0	161,0	14

Eine interessante Erscheinung ist hier noch zu erwähnen, welche sich ebenfalls bei Betrachtung der auf den einfachen Konus bezüglichen Kurven ergiebt:

Das Maximum der Anziehung ändert hier nämlich mit der Stromstärke seine Lage, wie aus der folgenden Zusammenstellung hervorgeht:

Stromstärken in Ampère:

1,53 2,94 4,85 5,91 8,07,

Abstand des Maximums vom unteren Kernende in Centimetern:

13 16,5 19 20 21,5.

Man erkennt, dafs mit wachsender Stromstärke der Punkt der maximalen Anziehung

sich vom unteren dünnen Kernende weg nach dem oberen dicken hin verschiebt. Der Grund dieser Erscheinung ist jedenfalls in der grofsen Anhäufung von Eisenmassen an dem einen Ende des Schuckert'schen Konus zu suchen. Die Verschiebung des Nullpunktes der Anziehung ist gegenüber der des Maximalpunktes nur gering, doch scheint es, als ob sich derselbe mit wachsender Stromstärke einer Lage nähere, welcher die Koïnzidenz des Spulenmittelpunktes mit dem Schwerpunkte des Konus entspricht.

Im Ganzen folgt also auch aus den experimentell gewonnenen Resultaten, dafs der einfach konische Kern allerdings nach der hier in Betracht kommenden Seite hin einige wesentliche Vortheile vor den weiter oben besprochenen Kernformen voraus hat, dafs er aber doch der Forderung einer für längere Strecken konstanten Anziehung nicht genügt, denn Schwankungen in der Anziehung von 14 bis 15% bei Verschiebung um 10 cm kann man wohl nicht als zulässig bezeichnen.

Untersuchung einer neuerdings von Křižik vorgeschlagenen Kernform:

In dem bereits oben erwähnten, erst im vorigen Jahr erschienenen Aufsatze berichtet Křižik neben seinen Versuchen über die Lage des Punktes der maximalen Anziehung eines Eisenzylinders auch über das Verhalten anderer Kernformen, welche in noch höherem Grade als der einfache Konus eine konstante Anziehung zeigen sollen. Diese neuen Kerne sind gewonnen durch Zusammenfügung zylindrischer und konischer Eisentheile, und die Anziehungskurven für zwei derselben zeigen verhältnifsmäfsig günstige Formen, indem sie auf eine Strecke von etwa 7 cm geradlinig

und parallel der Abszissenaxe verlaufen. Es erschien mir daher von Interesse, mit einem solchen Kern und unter Anwendung verschieden starker Ströme diese neuesten Versuche Křižiks zu wiederholen. Ich wählte den als vorletzter in der Abhandlung beschriebenen Kern, dessen Dimensionen noch genau aus dem Text ersichtlich sind, und untersuchte denselben bei fünf verschiedenen Stromstärken. Der Kern ist in Fig. 3 b in $^1/_4$ natürl. Gröfse dargestellt, während sich die erhaltenen Anziehungskurven auf Diagramm 4 (S. 23) befinden.

Man erkennt zunächst, dafs für derartige komplizirtere Kernformen mit Aenderung der Stromstärke auch die ganze Gestalt der Anziehungskurven eine andere wird, eine Erscheinung, deren Grund wieder darin zu suchen ist, dafs die magnetische Sättigung der einzelnen Kerntheile bei verschieden hoher Stromstärke erfolgt. Es wird also ein derartiger Kern nur für eine ganz bestimmte Stromstärke ein günstiges Resultat liefern. Diese günstigste Stromstärke scheint bei dem untersuchten Kerne 3 bis 4 Ampère zu betragen. Da erhält man eine Strecke konstanter Anziehung, die allerdings bei meinen Versuchen kürzer ausgefallen ist, wie bei denen Křižiks. Als Kern konstanter Anziehung wird man also auch diese neuen Formen wohl kaum bezeichnen können; die Grenzen sind zu eng, innerhalb deren man verschieben kann, ohne dafs die Anziehungskraft eine zu grofse Aenderung erleidet. Selbst wenn man die letzte und günstigste Kurve, welche Křižik für einen unten paraboljsch abgedrehten Kern gefunden hat, betrachtet[7]), so ist eine konstante

[7]) Vgl. Uppenborn, Centralblatt 1885, S. 165, Fig. 182.

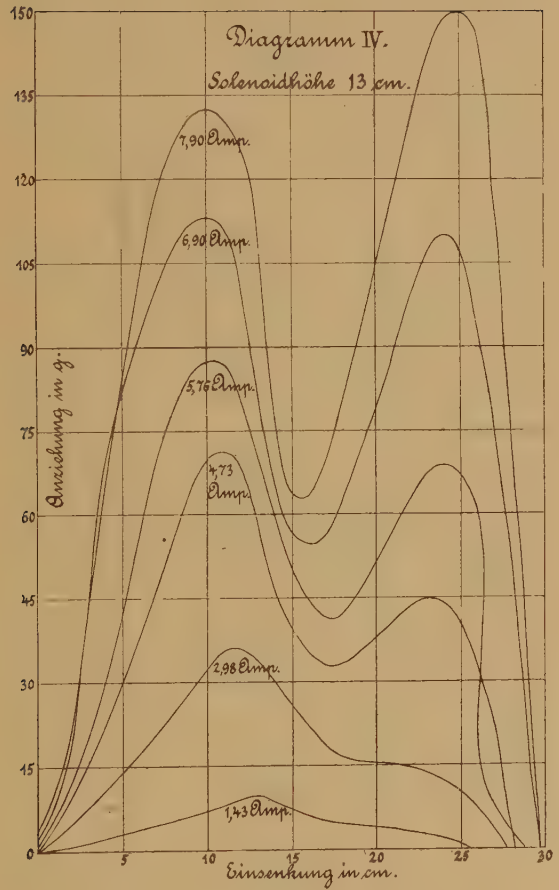


Diagramm IV.
Solenoidhöhe 13 cm.
7,90 Amp.
6,90 Amp.
5,76 Amp.
4,73 Amp.
2,98 Amp.
1,43 Amp.
Anziehung in g.
Einsenkung in cm.
150
135
120
105
90
75
60
45
30
15
0
5
10
15
20
25
30

Anziehung auch hier nur für eine Strecke von 7 cm vorhanden, während sich, wenn man das vorhergehende Maximum noch mit in Betracht zieht, für eine Verschiebung um 11 cm bereits Schwankungen von 11,9% in der Anziehungskraft ergeben. Ferner aber würde für einen Bogenlampen-Regulator ein derartiger Kern auch schon aus dem Grunde nicht verwerthbar sein, weil er bei einer viel zu geringen Stromstärke seine günstigste Wirkung zeigt.

Bei den hier beschriebenen Versuchen, meinen eigenen sowohl wie denen Křižiks, war immer das nämliche Solenoid, das in beiden Fällen etwa 13 cm hoch war, verwendet worden. Es erschien mir von Interesse, gerade für diese komplizirtere Kernform auch die Anziehung von Solenoiden anderer Dimensionen zu bestimmen, und ich unterwarf daher meinen Eisenkern auch der Wirkung zweier Spiralen, deren Höhen die Hälfte bezw. ein Viertel der anfänglich verwendeten betrugen. Auch hier ergaben sich die günstigsten Verhältnisse bei einer Stromstärke von 3 bis 4 Ampère. Der ganze Typus der Kurve ist wenig verändert, es scheint jedoch, als ob sich mit kürzeren Spulen hier bessere Resultate erzielen lassen, denn die der Abszissenaxe nahezu parallelen Strecken sind etwas länger geworden. Natürlich ist aber auch auf der anderen Seite die absolute Gröfse der Anziehungskraft verringert.

Neue Versuche zwecks Ermittelung eines Kernes konstanter Anziehung.

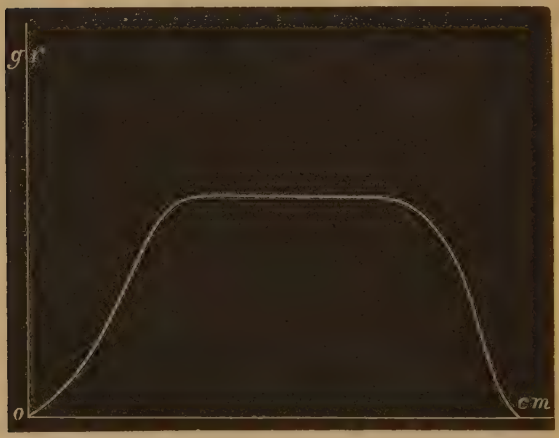
Als ich mich selbst an die Lösung der Aufgabe machte, für ein gegebenes Solenoid einen Kern möglichst konstanter Anziehung

zu konstruiren, erschienen mir für diesen Zweck die folgenden, theils aus den bisher angeführten Untersuchungen, theils auf Grund einfacher Ueberlegungen sich ergebenden Sätze und Regeln von Bedeutung:

Es ist möglich, für jedes Solenoid eine Kernform zu finden, welche der Forderung nahezu konstanter Anziehung bei verhältnifsmäfsig grofser Verschiebung genügt. - Die Anziehungskurve ändert im Allgemeinen mit der Stromstärke ihre Gestalt, und nur für innerhalb gewisser Grenzen befindliche Ströme wird ein komplizirt geformter Kern am günstigsten wirken. — Die Wirkung eines Solenoids auf einen Kern ist eine Differenzwirkung und setzt sich zusammen aus einer positiven und einer negativen, deren jede von einem Pole des Solenoides ausgeübt wird. — Da die Wirkungskomponente des Solenoides in der Richtung seiner Axe umgekehrt einer höheren Potenz seines Abstandes proportional ist, so wird in hervorragender Weise immer auf die in der Nähe der Solenoidpole befindlichen Eisentheile gewirkt werden. Aus den beiden letzten Sätzen folgt, dafs sich eventuell für ein bestimmtes Solenoid verschiedene gleich günstig wirkende Kernformen angeben lassen, denn man kann, wenn z. B. für eine gewisse relative Lage des Kernes die Anziehung zu stark ist, diesem dadurch abhelfen, dafs man denselben entweder in der Nähe des positiven Solenoidpoles dünner oder in der Nähe des negativen Poles dicker macht. - Es wird am zweckmäfsigsten sein, die Strecke konstanter Anziehungen aus den Punkten der maximalen Anziehung zu bilden, so dafs die Anziehungskurve etwa folgende Gestalt erhält (vgl. Fig. 4, S. 26). Man wird so unabhängiger von der

speziell ausprobirten Stromstärke. — Um die Strecke der konstanten Anziehung möglichst lang zu machen, mufs man die Kernform so wählen, dafs die Kurve möglichst steil ansteigt und abfällt, und dafs der Punkt, in welchem die Anziehung gleich Null ist, möglichst weit gegen das eine Kernende verschoben ist. Der letzten Forderung wird, wie schon oben bemerkt, dadurch genügt, dafs man den Kern nach

Fig. 4.



dem einen Ende zu dicker werden läfst und hier noch gröfsere Eisenmassen in irgend einer Form anbringt. Ein am Anfange steiles Aufsteigen der Kurve erreicht man dadurch, dafs man in der Nähe des unteren Kernendes das Eisen plötzlich verdickt bezw. wulstartig anhäuft. Eine derartige Anhäufung von Eisen am unteren Kernende scheint auch noch in anderer Weise günstig wirken zu können: Konstruirt man nämlich den Kern so, dafs,

wenn sich die Anziehungskurve ihrem Maximalpunkte nähert, gerade der untere Wulst dem unteren Solenoidpole nahe kommt, so wird die negative Wirkung dieses letzteren verhältnifsmäfsig stark und drückt die Punkte der maximalen Anziehung herab.

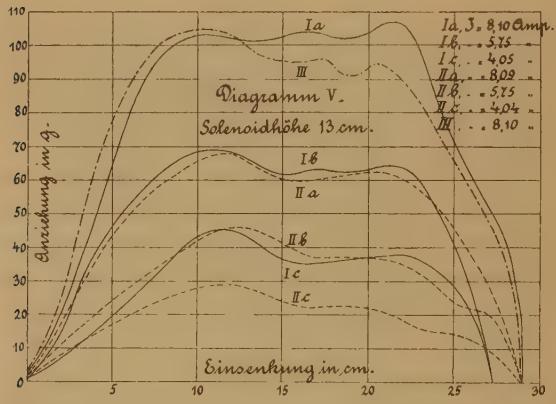
Von diesen Grundsätzen ausgehend, konstruirte ich zunächst einen Kern, dessen Oberfläche von Parabeln begrenzt wurde und welcher die in Fig. 3c gezeichnete Gestalt hatte. Die Untersuchung zeigte, dafs hier wohl der Vortheil des steilen Aufsteigens der Anziehungskurve erreicht war, dafs aber bei höheren Stromstärken ähnliche Verhältnisse eintraten, wie bei den zuletzt beschriebenen Křižik'schen Kernen:

Die negative Wirkung der unteren Eisenmasse war verhältnifsmäfsig zu stark und bewirkte, dafs gerade da, wo sonst ohne den unteren Wulst der Maximalpunkt der Kurve sich befunden hätte, jetzt eine ziemlich tiefe Einsenkung derselben sich zeigte.

Wollte man also den Vortheil, den eine nahe am Kernende angebrachte Eisenanhäufung gewährt, nicht aufgeben, so mufste die zu bedeutende negative Wirkung derselben in irgend einer Weise kompensirt werden. Am einfachsten erreicht man das wohl dadurch, dafs man einen zweiten Eisenwulst oberhalb des ersten anbringt, der sich gerade dann in der Nähe des positiven Solenoidpoles befindet, wenn der untere Wulst dem negativen Pole nahe kommt. Eine so modifizirte Kernform ergab bereits wesentlich bessere Resultate, genügte aber anfänglich auch noch nicht den gestellten Anforderungen. Erst nach einer langen Reihe von Versuchen und gröfseren

oder kleineren Abänderungen gelang es mir, auf Grund der angegebenen Prinzipien einen Kern zu konstruiren, der bei etwa 8 Ampère und einer Verschiebung um eine gröfsere Strecke (12 bis 15 cm bei einer Kernlänge von 36 cm) eine angenähert (bis auf 5 % Schwankungen) konstante Anziehung zeigte.

Ich gelangte schliefslich zu der in Fig. 3 d gezeichneten Form und erhielt die Anziehungskurve Ia auf Diagramm 5. Diese letztere ist



zwar ebensowenig wie die des vorigen Kernes genau gerade und parallel der Abszissenaxe, zeigt aber doch auf einer verhältnifsmäfsig langen Strecke nur geringe (5 bis 6 % betragende) Schwankungen der anziehenden Kraft und dürfte praktisch der ihr entsprechende Kern für einen Regulator wohl verwerthbar sein. Es wäre möglich, durch weitere zweckmäfsige Aenderungen der Kernform die Anziehungskurve noch günstiger zu gestalten, doch würden gerade diese letzten Verbesserungen ganz unverhältnifsmäfsig viel Zeit und Mühe erfordern.

Man hat gerade hier immer zu berücksichtigen, daſs eine Aenderung des Kernquerschnittes an einer bestimmten Stelle gleich auch auf das Verhalten des ganzen Kernes wegen der geänderten Vertheilung der Eisenmassen zurückwirkt und leicht eine Verschiebung des Null- und Maximalpunktes der Anziehung zur Folge haben kann. Ueberhaupt ist ja, wie man leicht erkennt, das Abgleichen eines solchen Eisenkernes für eine höhere Stromstärke viel schwieriger, wie für eine geringere.

Nachdem so mit einem bestimmten Kerne verhältniſsmäſsig günstige Resultate erzielt waren, erschien es mir noch von Wichtigkeit, einen Versuch über die Reproduzirbarkeit einer ausprobirten Kernform anzustellen. Zu diesem Zwecke lieſs ich einen dem oben beschriebenen möglichst gleichen Eisenkern herstellen und untersuchte ihn bei derselben Stromstärke, die vorhin angewendet war. Ich erhielt die Anziehungskurve III auf Diagramm 5.

Leider war dieser zweite Kern nicht ganz genau dem ersten gleich, sondern um mehrere Gramm leichter ausgefallen. Daher kommt es, daſs seine Kurve nicht ganz den günstigen Verlauf der ersten hat, sondern gegen das eine Ende hin eine zu geringere Anziehung zeigt. Die Form der beiden Kurven ist jedoch ganz ähnlich, und man kann immerhin den Schluſs ziehen, daſs ein genau reproduzirter Eisenkern auch alle guten Eigenschaften des Originales zeigen wird.

Auch aus Guſseisen lieſs ich Kerne nach dem vorigen Modell anfertigen und verglich dieselben zunächst mit dem Original aus Schmiedeeisen.

Die Kurven II auf Diagramm 5 gehören guſseisernen Kernen an. Man sieht, wie es

auch zu erwarten war, dafs für die letzteren die Anziehungskurve weniger günstig ausfällt, und dafs hier überhaupt die absolute Gröfse der anziehenden Kraft bedeutend geringer ist als bei Verwendung von Schmiedeeisen. Diagramm 5, IIb und IIc, sowie Ib und Ic geben die Anziehungen eines dieser Gufseisenkerne und des schmiedeisernen Modelles für geringere Stromstärken und es zeigt sich, dafs ein nach den oben angegebenen Prinzipien konstruirter Schmiedeeisenkern durch innerhalb gewisser Grenzen bleibende Stromschwankungen nicht wesentlich in seiner Wirkung beeinflufst wird.

Endlich ist noch ein Versuch zu erwähnen, welchen ich anstellte, um zu sehen, ob die gröfsere oder geringere Weichheit des Schmiedeeisens von grofsem Einflufs auf die Gestalt der Anziehungskurve sei. Ich glühte zu diesem Zwecke meinen Kern, der aus gewöhnlichem Eisen geschmiedet und dann abgedreht war, aus und verglich die Form der Anziehungskurve mit einer vor dem Ausglühen erhaltenen. Es zeigt sich, dafs ein wesentlicher Unterschied zwischen ihnen nicht vorhanden ist. Es scheint hier also mehr auf die Form des Kernes wie auf das Material, falls dasselbe überhaupt nur Schmiedeeisen ist, anzukommen.

Ueber die mathematische Behandlung der oben experimentell untersuchten Probleme.

Eine Bemerkung über die mathematische Behandlung der Aufgabe, die Anziehung eines Eisenkernes von endlichen Dimensionen durch ein Solenoid zu ermitteln und eine Kernform zu berechnen, welche einem sogenannten Kern konstanter Anziehung entspricht, mufs gleich damit beginnen, dafs eine wirkliche Lösung dieses Problems zur Zeit wohl unmöglich ist. Es liegen zwar bezüglich der ersten Aufgabe theoretisch gewonnene Resultate vor, doch beziehen sich dieselben nur auf die allereinfachsten Fälle, und auch da noch unter Zugrundelegung ganz spezieller vereinfachender Voraussetzungen. Eine allgemeine Lösung ist hier schon aus dem Grunde so schwierig oder unmöglich, weil bei Eisenkernen endlicher Dimensionen die magnetische Wechselwirkung der Moleküle und die Vertheilung des Magnetismus wesentlich in Betracht kommen, und zwar in unserem Falle speziell als variable Gröfsen, welche sich mit der relativen Lage von Spule und Kern ändern. Nur wenn man diese Faktoren aufser Acht läfst, kann man die einfachsten der hier in Betracht kommenden Fälle einer mathematischen Behandlung

unterwerfen, deren Resultate aber natürlich nur sehr unvollkommen über die betreffenden Erscheinungen Aufschluſs geben. Wir können deshalb kurz über die theoretischen Untersuchungen hinweggehen und bemerken über dieselben nur Folgendes:

Die Wirkung eines Solenoides auf einen konaxialen Eisenzylinder haben besonders Haedencamp[8]) und v. Waltenhofen[9]) mathematisch behandelt, und zwar haben dieselben das Problem dadurch vereinfacht, daſs sie nur einen wesentlich linearen Eisenzylinder, dessen Querdimensionen zu vernachlässigen sind, in Betracht zogen und auch hier die Wechselwirkung der Moleküle nicht berücksichtigten. Sie haben unter diesen Voraussetzungen Resultate erhalten, welche eine geometrische Deutung zuliefsen und in folgenden Sätzen ihren Ausdruck finden:

Nach Haedencamp[10]) ist die Wirkung einer zylindrischen Magnetisirungsspirale auf einen zylindrischen konaxialen Eisenkern proportional der Stromstärke[11]) und der Differenz der Summe der Diagonalen und der Summe der nicht parallelen Seiten des Trapezes, dessen parallele Seiten die Axe des Eisenkernes und eine Seite des Spiralenzylinders bilden.

v. Waltenhofen findet: Die magnetisirende Wirkung einer Spirale auf einen Eisenkern ist proportional dem Produkt der Stromstärke mit der Summe der Kosinus aller Winkel, welche

---

[8]) Conf. Crelle's Journal, Bd. 44, Seite 83 ff.

[9]) Conf. Sitzungsberichte der k. k. Akademie der Wissenschaften in Wien, mathematisch-physikalische Klasse, 1873, Bd. 67 (2.), S. 417 ff.

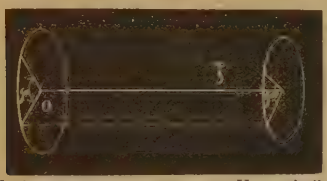
[10]) Conf. G. Wiedemann's Lehre von der Elektrizität, Bd. III, S. 210.

[11]) Die anziehende Wirkung ist natürlich proportional dem Quadrat der Stromstärke, wie es auch meine Kurven ergeben.

die in der Ebene eines axialen Schnittes von einem Punkte jeder Windung zu den Endpunkten der Axe des Kernes gezogenen Graden mit derselben einschliefsen. [12])

Bei den hier behandelten Problemen können jedoch die Querdimensionen der Eisenkerne natürlich nicht vernachlässigt werden, und man erhält weniger einfache Resultate, selbst wenn man das Solenoid durch einen einzigen Kreisstrom ersetzt und wieder eine gleichmäfsige Vertheilung des Magnetismus durch den ganzen Eisenkern hindurch annimmt, also von der

Fig. 5.



Kreisstrom. Kernscheibe.

Wechselwirkung der Moleküle absieht. Man kann sich unter dieser Voraussetzung den als Rotationskörper gebildeten Kern in lauter unendlich dünne Scheiben zerlegt denken, die gewissermafsen magnetische Doppelflächen bilden und dann die Formeln anwenden, welche sich auf die Wechselwirkung zwischen einem Kreisstrom und einer magnetischen Doppelfläche oder zwischen zwei geschlossenen Kreisströmen beziehen. Diese Formel würde für die gezeichnete Lage von Kreisstrom und Kernquerschnitt zu einander lauten: Es ist die Wirkungskomponente in der Axenrichtung:

[12]) Conf. G. Wiedemann, Lehre von der Elektrizität, Bd. 3, S. 210.

$$Z = \int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{\cos(\varphi - \varphi') \cdot \zeta \cdot R\, d\varphi\, \rho\, d\varphi'}{\left\{R^2 + \rho^2 + \zeta^2 + 2\rho R\cos(\varphi - \varphi^1)\right\}^{\frac{3}{2}}}.$$

Dabei ist R der Radius des Kreisstromes, ρ derjenige des Kernquerschnittes, ζ der Abstand der Mittelpunkte beider, vom Kreisstrom aus gerechnet, endlich φ und φ' die Winkel, um welche die Radivektoren der betrachteten Elemente gegen eine feste Ebene geneigt sind. Ein konstanter Faktor, der von der Stromstärke abhängt, ist fortgelassen. Zum Zwecke der Integration kann man in eine Reihe nach Potenzen des cos entwickeln, und erhält nach Ausführung der Rechnung, da bei Einsetzung der Integrationsgrenzen alle Glieder, die eine trigonometrische Funktion enthalten, fortfallen:

$$Z = \frac{6\pi R^2 \rho^2 \zeta}{\left\{R^2 + \rho^2 + \zeta^2\right\}^{\frac{5}{2}}} \left\{1 + \tfrac{1}{4} \cdot \frac{3 \cdot 5 \cdot 7\, R^2 \cdot \rho^2}{1 \cdot 2 \cdot 3\,(R^2 + \rho^2 + \zeta^2)^2} + \tfrac{1}{4} \cdot \tfrac{5}{6} \cdot \frac{3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 11 \cdot R^4 \rho^4}{(R^2 + \rho^2 + \zeta^2)^4 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} + \cdots \right\}.$$

Wollen wir hieraus weiter die Wirkung auf einen endlichen Eisenkern von der Länge l berechnen, so führen wir am besten neue Koordinaten so ein, wie es Fig. 6 auf S. 35 zeigt, nach der also $\zeta = z - z'$ zu setzen ist.

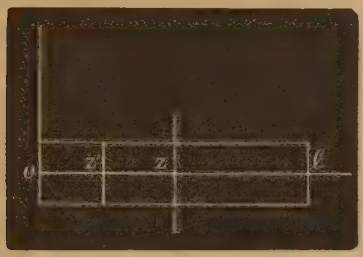
Es ergiebt sich dann:

$$W_z = 6\pi R^2 \rho^2 \int_0^l \frac{(z - z')\, dz'}{\left\{R^2 + \rho^2 + (z - z')^2\right\}^{\frac{5}{2}}} \left\{1 + \frac{4{,}375\, R^2 \rho^2}{(R^2 + \rho^2 + [z - z']^2)^2}\right.$$

$$+\frac{18{,}049\,R^4\rho^4}{(R^2+\rho^2+[\zeta-\zeta']^2)^4}+\cdots\Bigg\}$$

für einen zylindrischen Eisenkern mit konstantem ρ, während man für einen Konus, dessen Spitze im Nullpunkt liegt, $\rho = \zeta' \operatorname{tg}\alpha$ einzuführen hat, wo α den halben Oeffnungswinkel bedeutet. Das allgemein oben experimentell behandelte Problem endlich, einen Kern konstanter Anziehung zu ermitteln, würde man jetzt auch so formuliren können: Es ist die

Fig. 6.



Variable ρ als Funktion von ζ' allein so zu bestimmen, dafs der Relation

$$\int_0^l \frac{\rho\,(\zeta-\zeta')\,d\zeta'}{\{R^2+\rho^2+(\zeta-\zeta')^2\}^{\frac{5}{2}}}$$

$$\left\{1+\tfrac{1}{4}\cdot\frac{3\cdot5\cdot7\cdot R^2\rho^2}{1\cdot2\cdot3(R^2+\rho^2+[\zeta-\zeta']^2)^2}+\cdots\right\}=\text{const}$$

für jedes ζ, das innerhalb gewisser Grenzen liegt, genügt wird. —

Für einen zylindrischen Eisenkern läfst sich die Ermittelung des W_ζ leicht ausführen, und zwar erhält man durch die Integration nach Einsetzung der Grenzen:

$$W_z = \frac{6\pi R^2 \rho^2}{3\left\{R^2+\rho^2+(z-l)^2\right\}^{\frac{3}{2}}} - \frac{6\pi R^2 \rho^2}{3\left(R^2+\rho^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{6\pi \cdot 4{,}375\, R^4 \rho^4}{7\left\{R^2+\rho^2+(z-l)^2\right\}^{\frac{7}{2}}} - \frac{6\pi \cdot 4{,}375\, R^4 \rho^4}{7\left(R^2+\rho^2+z^2\right)^{\frac{7}{2}}} + \cdots$$

Für einen Konus liefert jedoch bereits die Integration des ersten Gliedes ein sehr komplizirtes und nicht mehr übersichtliches Resultat.

Wir wollen jetzt zum Schlufs noch einige Bemerkungen über die für die Anziehung eines Zylinders gefundene Formel machen:

Man erkennt ohne Weiteres, dafs W_z zu Null wird, wenn man z, d. h. den Abstand des Kreisstromes, vom Nullpunkt oder Zylinderanfang gleich $l/2$ macht. In dieser Hinsicht giebt also die Formel dasselbe Resultat wie das Experiment. Anders jedoch verhält es sich, wenn man den Maximalpunkt der Anziehung ins Auge fafst. Nach der Formel findet das Maximum der Anziehung statt, wenn $z = o$ oder $z = l$ ist, d. h. wenn sich der wirkende Kreisstrom ganz am Ende des Kernes befindet. Etwas Anderes aber ergiebt das Experiment, wie mir die Untersuchung eines Solenoides von mehreren Lagen aber nur einer Windung zeigte, dessen Wirkung immerhin mit der eines einzelnen Kreisstromes auf einen Eisenzylinder indentifizirt werden kann. Hier haben wir das Maximum erst, nachdem die Spule bereits eine Strecke weit auf den Kern heraufgeschoben ist, und erkennen also, dafs die am Anfange dieser Betrachtung gemachten

vereinfachenden Voraussetzungen nicht zulässig sind. Es ist ja klar, dafs diese Verschiebung des Maximalpunktes in nichts weiter ihren Grund hat, als darin, dafs die Magnetisirung des Eisenkernes wegen der Wechselwirkung der Moleküle um so stärker wird, je weiter man die Spule nach dem Kernmittelpunkte hin verschiebt. —

An dieser Stelle möge jetzt auch noch ein Versuch erwähnt werden, auf welchen ich bei der theoretischen Betrachtung der Anziehung eines Eisenzylinders geführt bin, und welcher zeigt, dafs man auch ohne Verwendung einer komplizirten Kernform die Strecke der im selben Sinne erfolgenden Anziehung zu einer recht langen und verhältnifsmäfsig gleichförmigen machen kann. Das bestimmte Integral für die Wirkung eines Stromkreises auf einen Eisenzylinder läfst sich, conf. oben, schreiben als:

$$W_\zeta = F(\zeta - \zeta')_o^l = F(\zeta - \zeta')_o^\zeta + F(\zeta - \zeta')_\zeta^l$$
$$= F(\zeta - l) - F(\zeta) = F(o) - F(\zeta) + F(\zeta - l) - F(o),$$

und man sieht, dafs das zu Null- und Negativwerden von W_ζ seinen Grund in den alternirenden Vorzeichen dieses allgemeinen Ausdruckes hat. Könnte man einen Eisenzylinder mit einem Solenoid so kombiniren, dafs man setzen dürfte:

$$W_\zeta = F(\zeta - \zeta')_o^\zeta - F(\zeta - \zeta')_\zeta^l = 2F(o) - F(\zeta - l) - F(\zeta),$$

so wäre der Nachtheil, den eine zylindrische Form mit sich bringt, beseitigt, denn dieser Ausdruck behält offenbar für jedes ζ, d. h. für jede Lage der Spule, sein Zeichen, da das erste konstante Glied $2F(o)$ immer gröfser ist wie

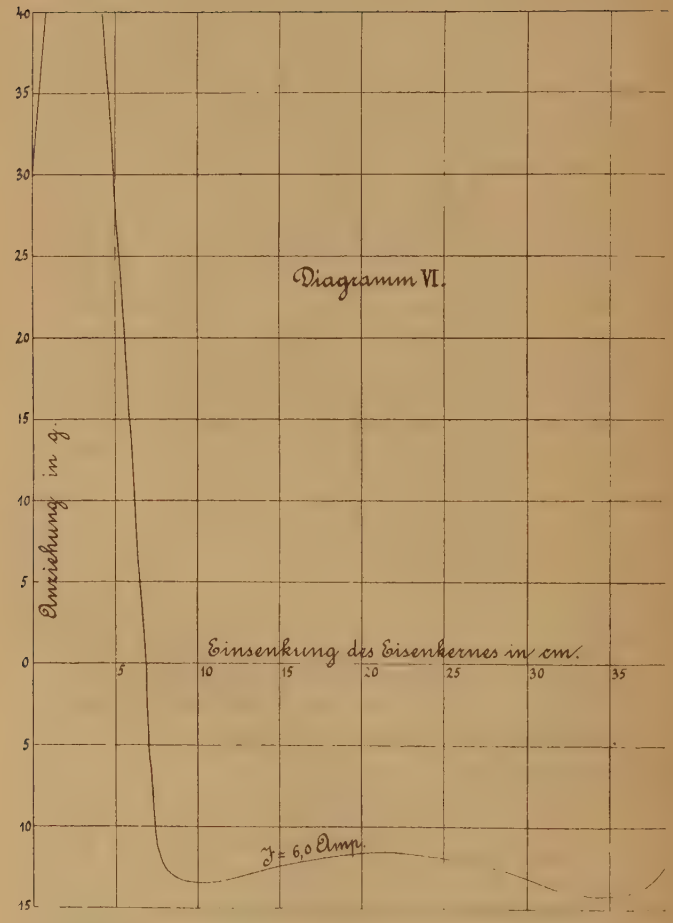


Diagramm VI.
Anziehung in g.
Einsenkung des Eisenkernes in cm.
J = 6,0 Amp.
40
35
30
25
20
15
10
5
0
5
10
15
5
10
15
20
25
30
35

die beiden letzten zusammengenommen. Es fragt sich nun noch, ob man diese Umkehrung des Zeichens für den einen Theil des Integrales ins Praktische übersetzen kann. Das ist aber in der That, näherungsweise wenigstens, der Fall. Man braucht nur einen Eisenkern zu benutzen, der an den Enden gleiche Pole zeigt, oder unter Beibehaltung des regulär magnetisirten Eisenkernes ein Solenoid mit gleichen Endpolen und Doppelpunkt in der Mitte. Bei einer derartigen Kombination kann natürlich nicht die Magnetisirung des Eisenkernes durch die Spule bewirkt werden, sondern man mufs denselben extra erregen. Ich habe meinen über diesen Gegenstand angestellten Versuch so angeordnet, dafs ich den Strom zuerst in das Solenoid mit Doppelpol leitete und von da mittels Quecksilbernäpfe um den mit Draht bewickelten zylindrischen Eisenkern, der so zu einem regulären Elektromagnet wurde. Natürlich mufste das gleichpolige Solenoid eine Reihe von Windungen neben einander haben, seine Höhe betrug 8,3 cm, und durch diesen Umstand wurde bewirkt, dafs die bezügliche Anziehungskurve, welche Diagramm 6 (S. 38) zeigt, im Anfang ihres Verlaufes das entgegengesetzte Zeichen hat, wie weiterhin auf der langen angenähert, den theoretischen Voraussetzungen entsprechenden Strecke. Die letztere ist jedoch auch so immerhin noch gröfser, als bei Verwendung eines komplizirten Eisenkernes und eines gewöhnlichen Solenoids die benutzbare Strecke konstanter Anziehung gefunden wurde.